Journal Purifikasi
DOI: https://doi.org/10.12962/purifikasi.v24i1.504

RESEARCH ARTICLE / REVIEW ARTICLE

OPEN ACCESS

Check for updates

UJI RETANG DOSIS RED MUD SEBAGAI AMANDEMEN TANAH DENGAN KOMBINASI PUPUK KANDANG TERHADAP PERTUMBUHAN TANAMAN SAWI (*Brassica juncea*)

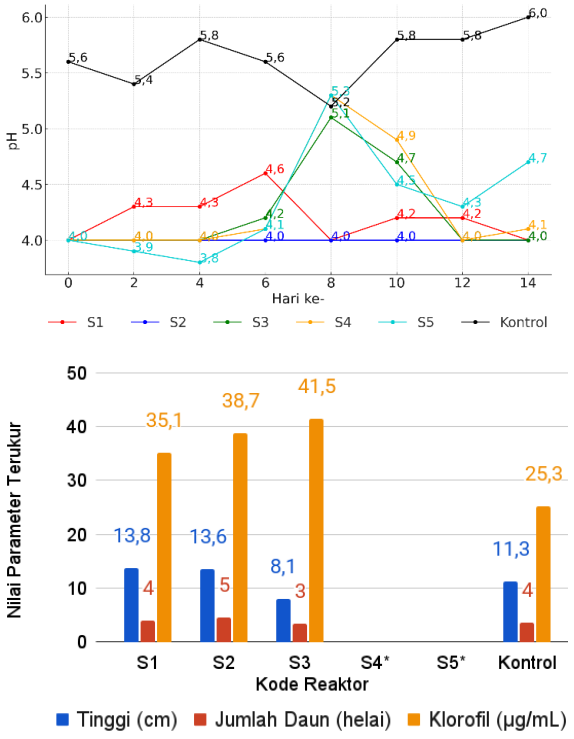
Article history
Received
26 July 2025
Received in revised form
27 July 2025
Accepted
27 July 2025
Published online
29 July 2025

Natasya Febriani Fauziah[1)], Harmin Sulistyaning Titah[1,2*)], Bieby Voijant Tangahu[1,2)], Andriyani Yulikasari[1,2)], Ervin Nurhayati[1,2)], Isni Arliyani[1,2)]

[1,2)]Environmental Engineering Department, Faculty of Civil Planning and Geo Engineering Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, [2)] Research Center for Infrastructure and Sustainable Environment, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya 60111, Indonesia

*Corresponding author
harminsulis@gmail.com

Graphical abstract



ABSTRACT
Red mud (RM) merupakan limbah pemurnian bauksit yang berpotensi dimanfaatkan sebagai amandemen tanah, tetapi penggunaannya terkendala oleh sifat basa dan kandungan logam berat. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi toleransi *Brassica juncea* terhadap variasi dosis RM yang dikombinasikan dengan pupuk kandang. Pengujian dilakukan selama 14 hari menggunakan variasi dosis RM 3%, 5%, 10%, 15%, dan 20% pada campuran tanah kebun dan pupuk kandang (2:1), dengan tanah kebun sebagai kontrol. Parameter yang diamati meliputi pertumbuhan tanaman, kandungan klorofil, biomassa, serta karakteristik kimia tanah. Hasil menunjukkan bahwa dosis RM hingga 10% masih mendukung kelangsungan hidup tanaman, sedangkan dosis 15% dan 20% menyebabkan kematian tanaman. Dosis 5% memberikan hasil optimal dengan peningkatan tinggi tanaman 20%, jumlah daun 25%, klorofil 53%, dan biomassa kering 156% dibandingkan kontrol. Kombinasi RM dan pupuk kandang meningkatkan ketersediaan unsur hara N, P, dan K dengan kadar logam berat yang dilaporkan tetap di bawah ambang batas FAO/WHO. Penelitian ini menunjukkan potensi pemanfaatan RM sebagai amandemen tanah secara berkelanjutan melalui pengaturan dosis dan penambahan bahan organik.

Keywords: Amandemen Tanah, *Brassica juncea*, Ekonomi Sirkular, Pupuk Kandang, Red Mud.

Copyright ©2026 Institut Teknologi Sepuluh Nopember, All rights reserved

Corresponding Author: Harming Sulistyaning Titah
harminsulis@gmail.com
Environmental Engineering Department, Faculty of Civil Planning and Geo Engineering Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

1. INTRODUCTION

Red mud (RM) merupakan limbah industri dari proses *Bayer* dalam pengolahan bauksit menjadi alumina, dengan jumlah produksi global mencapai sekitar 175 juta ton per tahun (Svobodova-Sedlackova *et al.,* 2024). Karakteristik kimia RM yang bersifat sangat basa (pH 9–13) dan mengandung logam berat seperti Al, Cr, dan Na menjadikannya limbah yang berpotensi mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. Meskipun demikian, RM juga mengandung unsur hara seperti Ca, Mg, K, S, Si, serta mikronutrien seperti Zn, B, dan Mo, yang berpotensi dimanfaatkan sebagai amandemen tanah (Mayes *et al.,* 2016; Wang & Liu, 2021). *Red mud* juga memiliki potensi menstabilkan kandungan logam dalam tanah diakrenakan kandungan oksida logam seperti *hematite* (Fe_2O_3), *boehmite* (γ-AlO(OH)), *gibbsite* ($Al(OH)_3$), dan *cancrinite* yang mengikat logam berat secara kuat, sehingga menekan bioavailabilitas logam untuk dapat diserap tanaman meskipun terjadi penurunan pH pada media (Lombi *et al.,* 2003; Mucsi *et al.,* 2021).

Pemanfaatan RM dalam bidang pertanian mulai mendapat perhatian sebagai bagian dari strategi *circular economy* untuk mengurangi ketergantungan terhadap *landfill*. Namun, keterbatasan seperti pH tinggi, kandungan natrium, dan potensi fitotoksisitas masih menjadi kendala. Kombinasi RM dengan bahan organik seperti pupuk kandang telah terbukti menurunkan pH, meningkatkan porositas, serta menstimulasi aktivitas mikroba tanah, sehingga dapat memperbaiki karakteristik media tanam (Irshad *et al.,* 2014; Praja, 2024). Hal ini membuka peluang untuk mengoptimalkan RM sebagai bahan amandemen pada tanah pertanian, bahkan di tanah non-terkontaminasi (Gautam & Agrawal, 2019). Bahan organik seperti pupuk kandang berperan penting dalam mengkelat logam berat di dalam media tanam melalui interaksi kimia dengan gugus fungsional aktif seperti karboksilat dan fenolat. Interaksi ini membentuk kompleks logam-organik yang stabil, sehingga logam-logam berat berpindah dari bentuk labil menjadi bentuk terikat organik yang kurang *bioavailable* dan lebih aman bagi tanaman (Wang *et al.,* 2021).

Tanaman sawi (*Brassica juncea*) merupakan tanaman sayur yang telah banyak digunakan dalam penelitian dikarenakan mampu menunjukkan respons fisiologis terhadap perubahan karaktersitik media tanam (Kim *et al.,* 2024). Beberapa studi sebelumnya melaporkan bahwa penggunaan RM dalam dosis rendah mampu meningkatkan biomassa tanaman dan menekan akumulasi logam berat dalam jaringan tanaman hingga berada dalam ambang batas aman FAO/WHO (Gautam & Agrawal, 2019; Hua *et al.,* 2017). Mekanisme stabilisasi logam oleh RM, dikombinasikan dengan suplai unsur hara dari pupuk kandang, memungkinkan perbaikan sinergis pada produktivitas tanaman sekaligus menjaga keamanan pangan (Gautam & Agrawal, 2019).

Penelitian ini bertujuan untuk menguji daya toleransi tanaman sawi terhadap variasi dosis RM yang dikombinasikan dengan pupuk kandang melalui *range finding test*. Studi ini penting sebagai tahapan awal untuk menentukan batas aman penggunaan RM dalam media tanam sayuran. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah bagi pemanfaatan RM secara lebih luas dan aman dalam sektor pertanian berkelanjutan serta mendukung integrasi limbah industri ke dalam sistem pertanian melalui pendekatan ekonomi sirkular.

2. MATERIALS AND METHODS

A. Persiapan Media Tanam

Red mud yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari lokasi pengolahan alumina di Kalimantan Barat, Indonesia. Pengambilan sampel RM dilakukan dengan metode *grab sampling,* di mana *fresh red mud* diambil pada titik *end process* dari proses *Bayer*. Sampel dikumpulkan dan

This journal is © Marsono, et al. 2026

disimpan dalam wadah plastik tertutup, dilapisi karung, serta diberi label identifikasi untuk mencegah kontaminasi silang dan pelindian selama proses pengiriman menuju laboratorium. *Red mud* segar tersebut selanjutnya dikeringkan secara alami (*air-dried*) di ruang terbuka selama 12 jam, kemudian diayak menggunakan ayakan no. 10 (ukuran 2 mm). Adapun pupuk kandang dan tanah kebun diperoleh secara komersial dari wilayah Mojo, Kecamatan Gubeng, Kota Surabaya, Jawa Timur, Indonesia.

B. Persiapan Tanaman *Brassica Juncea*

Benih *Brassica juncea* yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari benih komersial merek *East West Seed – Cap Panah Merah*, yang diperoleh di Surabaya, Indonesia. Tanaman ditumbuhkan di *greenhouse* Departemen Teknik Lingkungan FT-SPK ITS dengan kondisi lingkungan yang sama untuk memastikan tanaman yang digunakan dalam penelitian homogen. Proses germinasi berlangsung selama 14 hari, diikuti oleh tahap propagasi selama tiga minggu hingga tanaman memiliki 3–4 helai daun sejati (Asih *et al.,* 2015; Hoidal *et al.,* 2019). Selanjutnya, tanaman dipindahkan ke dalam pot berukuran 14 cm × 16 cm × 14 cm yang berisi media tanah kebun. Proses aklimatisasi dilakukan selama satu minggu guna meminimalisasi stres transplantasi dan mengoptimalkan adaptasi awal tanaman, serta dilakukan penyiraman setiap hari dengan intensitas ringan untuk menjaga kelembapan media pada kisaran 70–90% (Al-Hakim *et al.,* 2023).

C. Uji Rentang (Range Finding Test) - RFT

Uji Rentang Dosis dilaksanakan selama 14 hari berupa eksperimental skala laboratorium yang dilaksanakan di *greenhouse* Departemen Teknik Lingkungan FT-SPK ITS. Reaktor berupa pot berdiameter atas 25 cm, diameter bawah 17 cm, dan tinggi 17,5 cm. Masing-masing reaktor diisi dengan 3 kg media tanam dan ditanami tiga individu tanaman sawi (*Brassica juncea*) per reaktor (Tangahu *et al.,* 2021). Tanaman yang digunakan berumur ±35 hari sejak tanam, memiliki 3–4 helai daun, tinggi ±6-7 cm, serta menunjukkan kondisi fisiologi yang sehat tanpa gejala defisiensi maupun kerusakan jaringan. Komposisi media tanam merupakan campuran RM dengan tanah kebun dan pupuk kandang, dengan rasio tanah kebun:pupuk kandang sebesar 2:1 untuk seluruh reaktor perlakuan (Gautam & Agrawal, 2019). Variasi RM yang digunakan adalah 3%, 5%, 10%, 15%, dan 20% dari total media, sedangkan sisa persentase media merupakan campuran tanah kebun dan pupuk kandang. Reaktor kontrol menggunakan 100% tanah kebun tanpa penambahan RM. Detail reaktor disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Reaktor RFT

Kode Reaktor	Komposisi Media Tanam
S1	3% (*Red mud*) + 97% (Tanah kebun:Pupuk Kandang 2:1)
S2	5% (*Red mud*) + 95% (Tanah kebun:Pupuk Kandang 2:1)
S3	10% (*Red mud*) + 90% (Tanah kebun:Pupuk Kandang 2:1)
S4	15% (*Red mud*) + 85% (Tanah kebun:Pupuk Kandang 2:1)
S5	20% (*Red mud*) + 80% (Tanah kebun:Pupuk Kandang 2:1)

Kontrol	100% Tanah Kebun

Pemilihan variasi dosis RM didasarkan pada studi terdahulu yang mengevaluasi pemanfaatan RM sebagai amandemen tanah. Hua et al. (2017) melaporkan bahwa rentang dosis RM 2%–10% merupakan rentang aplikasi yang umum digunakan dalam berbagai studi pemanfaatan RM sebagai amandemen. Gautam dan Agrawal (2019) menguji dosis hingga 15% RM pada *Brassica juncea*, sedangkan dosis lebih tinggi menunjukkan kecenderungan fitotoksisitas. Sementara rentang dosis lebih tinggi (20%) pada penelitian ini digunakan untuk mengevaluasi potensi ambang batas fitotoksisitas serta pengaruh akumulasi RM dalam kombinasi bahan organik pada kondisi spesifik media yang digunakan dalam penelitian. Mengingat perbedaan karakteristik RM antar lokasi serta variabilitas respon antar spesies tanaman, maka pada penelitian ini menggunakan variasi dosis RM sebagaima tertera pada Tabel 1 (Xu *et al.,* 2016).

D. Pengamatan dan Pengukuran Parameter

Pengamatan selama uji rentang (RFT) mencakup *physical observation* terhadap pertumbuhan dan kematian tanaman pada hari ke-1, 7, dan 14, serta pengukuran pH media tanam dilakukan setiap dua hari sekali (OECD, 2006; Purwanti *et al.,* 2012; Titah *et al.,* 2012). Selain itu, pada akhir masa RFT (Hari ke-14) dilakukan pengukuran parameter pertumbuhan meliputi tinggi tanaman, jumlah daun, kandungan klorofil, berat basah, dan berat kering tanaman (Said *et al.,* 2021).

Pengukuran pH media tanam dilakukan dengan menggunakan alat *3-in-1 Soil Tester – Double Probe Soil pH Meter* (model *portable*). Pengukuran klorofil dilakukan dengan *Chlorophyll Meter Konica Minolta SPAD-502 Plus*. Kalibrasi klorofil dilakukan menggunakan metode ekstraksi klorofil Arnon (1949) dengan pelarut aseton 80%, diikuti pengukuran absorbansi untuk menghasilkan kurva kalibrasi regresi (linear, eksponensial, polinomial, logaritmik). Model polinomial dengan nilai regresi paling mendekati 1 (R^2 = 0,92) dipilih sebagai persamaan kalibrasi: $Y = 0{,}009x^2 - 0{,}444x + 7{,}734$, di mana nilai SPAD disubstitusikan ke dalam persamaan untuk memperoleh total klorofil (µg/mL) (Arnon, 1949; Moore, 2013).

Analisis karakteristik kimia dilakukan di Laboratorium Laboratorium Remediasi Lingkungan, Departemen Teknik Lingkungan FT-SPK ITS. Analisis karakteristik kimia bahan penyusun media tanam (RM, Tanah kebun, pupuk kandang) dan pada variasi media tanam yang digunakan pada uji RFT (reaktor S1-S5 dan kontrol) mencakup kandungan total karbon organik (TOC), nitrogen total (N), fosfor (P), kalium (K), unsur mikronutrien (Zn, Fe, Cu, Ni), serta unsur logam lainnya (Pb, Cd, Cr, V, Sc). Penentuan TOC dilakukan dengan destruksi asam menggunakan HCl, diikuti analisis menggunakan *Sievers InnovOx ES TOC Analyzer* (Schumacher, 2002), dengan batas deteksi minimal 0.05 mg/L berdasarkan spesifikasi pabrikan (*GE Analytical Instruments*, 2011). Nitrogen total diukur dengan metode *Kjeldahl* (Yusmayanti & Asmara, 2019), sedangkan fosfor menggunakan metode *Olsen extraction* (Umaternate *et al.,* 2014).

Analisis unsur kalium, unsur mikronutrien, dan logam lainnya dilakukan melalui proses destruksi asam *aqua regia* (US EPA 3050B, 1996). Larutan hasil destruksi kemudian dianalisis menggunakan instrumen *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy* (*ICP-OES Thermo Scientific iCAP Pro XP*), dengan penggunaan larutan standar multi-elemen untuk unsur Zn, Fe, Cu, Ni, Pb, Cd, dan Cr, sedangkan untuk unsur V dan Sc digunakan larutan standar tunggal (*single-element standard solution*) masing-masing untuk kalibrasi dan kontrol kualitas pengukuran. Batas deteksi

analisis logam untuk ICP-OES pada penelitian ini berkisar antara 0,01–0,05 mg/L, tergantung pada masing-masing unsur, dan ditetapkan berdasarkan standar validasi instrumen (US EPA 200.7, 1994).

3. RESULT AND DISCUSSION

A. Karakteristik Kimia Bahan Penyusun Media Tanam dan Reaktor Perlakuan pada Uji Rentang *(Range Finding Test)*

Karakteristik kimia bahan penyusun media tanam (red mud (RM), tanah kebun, dan pupuk kandang) serta media tanam pada uji rentang (reaktor S1-S5 dan kontrol) merupakan faktor penting yang menentukan ketersediaan hara yang mempengaruhi respons fisiologis tanaman selama uji rentang dosis RM. Data karakteristik ini dianalisis untuk mengevaluasi pengaruh kombinasi amandemen terhadap karakteristik kimia media tanam.

Karakteristik kimia bahan penyusun media tanam menunjukkan adanya variasi komposisi yang di antara RM, tanah kebun, dan pupuk kandang (Tabel 2). Red mud memiliki sifat sangat basa dengan pH 9,1, sedangkan tanah kebun menunjukkan pH mendekati netral (5,8), dan pupuk kandang cenderung agak asam (pH 4,0). Karakteristik pH yang tinggi pada RM berkaitan dengan kandungan alkali yang tinggi hasil dari proses Bayer, yang berpotensi meningkatkan pH media tanam saat dicampurkan (Hua *et al.,* 2017; Wang & Liu, 2021).

Tabel 2. Kandungan Nutrien dan Logam Bahan Penyusun Media Tanam

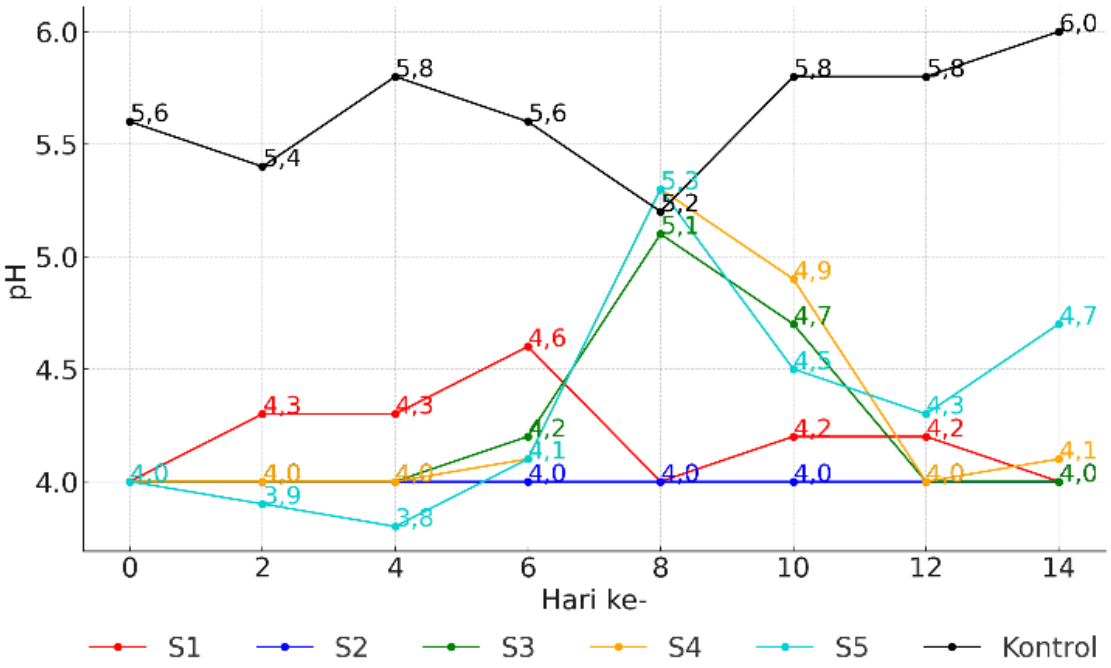
Parameter	Satuan	Red Mud	Tanah Kebun	Pupuk Kandang
A. Parameter umum				
pH	-	9,1	5,8	4,0
TOC	mg/kg	302,5	752,5	3.600
N	mg/kg	7.150	3.780	5.470
P	mg/kg	2.670	4.750	14.540
K	mg/kg	125,9	259,6	1187,9
B. Mikronutrien				
Zn	mg/kg	9,370	23,160	39,210
Fe	mg/kg	3.368,45	3.536,20	3.095,76
Cu	mg/kg	9,660	23,380	18,920
Ni	mg/kg	1,930	1,180	1,520
C. Logam Berat Lainnya				
Pb	mg/kg	0,980	3,200	2,730
Cd	mg/kg	0,000	0,030	0,070
Cr	mg/kg	53,210	7,910	8,490
V	mg/kg	28,100	11,040	7,330
Sc	mg/kg	13,060	6,570	3,870

Kandungan total karbon organik (TOC), nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) menunjukkan bahwa pupuk kandang dapat berperan sebagai sumber utama hara organik dan nutrisi makro. TOC

pada pupuk kandang mencapai 3.600 mg/kg, jauh lebih tinggi dibandingkan RM (302,5 mg/kg) dan tanah kebun (752,5 mg/kg). Demikian pula kandungan nitrogen total pada pupuk kandang (5.470 mg/kg) jauh lebih tinggi daripada pada RM (7.150 mg/kg) maupun tanah kebun (3.780 mg/kg). Kandungan fosfor total pupuk kandang (14.540 mg/kg) juga lebih tinggi dibandingkan dengan RM (2.670 mg/kg) dan tanah kebun (4.750 mg/kg), menandakan bahwa penambahan pupuk kandang memberikan kontribusi dominan dalam meningkatkan suplai P. Untuk kalium, pupuk kandang memiliki kandungan 1.187,9 mg/kg, yang lebih tinggi dibandingkan RM (125,9 mg/kg) dan tanah kebun (259,6 mg/kg). Hal ini sesuai dengan peran pupuk kandang sebagai sumber utama nutrisi organik dan makro untuk mendukung pertumbuhan tanaman.

Kandungan unsur mikronutrien (Zn, Fe, Cu, Ni) pada ketiga bahan penyusun relatif bervariasi. Red mud dapat menyumbang kadar Fe (3.368,45 mg/kg) dalam media dan unsur-unsur logam minor seperti Sc (13,06 mg/kg), Cr (53,21 mg/kg), dan V (28,10 mg/kg), yang secara alami terkandung dalam residu bauksit (Lombi *et al.,* 2003; Mucsi *et al.,* 2021). Tanah kebun dan pupuk kandang juga dapat memberikan kontribusi nutrien untuk Zn, Cu, dan Ni, yang umumnya berasal dari bahan organik atau aktivitas biologi (Gautam & Agrawal, 2019; Ramadhani *et al.,* 2025).

Sementara itu, kandungan logam berat toksik seperti Pb dan Cd pada ketiga bahan penyusun relatif rendah. Pb berkisar antara 0,98–3,20 mg/kg, dan Cd < 0,07 mg/kg. Nilai ini masih jauh di bawah baku mutu FAO/WHO untuk tanah pertanian (Cd: 3 mg/kg; Pb: 100 mg/kg), menunjukkan bahwa bahan penyusun media tanam dalam penelitian ini berada pada tingkat aman dari risiko kontaminasi logam berat (FAO/WHO, 2002; 2011).



Gambar 1. Perubahan pH pada Media Tanam

Selain dilakukan analisis karakteristik kimia pada bahan penyusun media tanam, dilakukan pula karakterisasi sifat kimia media tanam pada uji rentang dosis RM (RFT). Gambar 1 menunjukkan perubahan pH media tanam selama RFT, teramati bahwa pada seluruh reaktor perlakuan (S1-S5) berada pada kisaran pH 4–5 di mana rentang nilai ini tergolong sebagai pH asam (Harahap *et al.,*

2021). Di sisi lain, reaktor kontrol cenderung memiliki pH yang lebih stabil (pH 5.3–5.8), dengan peningkatan bertahap hingga mencapai pH 6 pada akhir masa RFT, yang menunjukkan kondisi yang lebih mendekati netral dan sesuai untuk pertumbuhan tanaman (Harahap *et al.,* 2021).

Seluruh reaktor perlakuan memiliki pH awal sebesar 4 pada hari ke-0 (Gambar 1). Pada reaktor S1 dan S2 teramati fluktuasi nilai pH yang ringan, namun tetap berada dalam rentang pH 4–4.6. Fluktuasi ini yang tidak terlalu besar mengindikasikan bahwa kondisi kimia media relatif stabil dan tidak menunjukkan adanya proses netralisasi yang dominan. Sementara itu, pada reaktor S3, S4, dan S5 teramati tren kenaikan pH, dengan puncak kenaikan terjadi pada hari ke-8—yakni pH 5.1 untuk S3, serta pH 5.3 untuk S4 dan S5. Namun pH kembali menurun secara bertahap hingga akhir RFT, di mana nilai pH akhir berada pada kisaran 4.0–4.7.

Media tanam yang memiliki pH asam dapat disebabkan oleh beberapa mekanisme. Pertama, fermentasi anaerob dari bahan organik dalam pupuk kandang menghasilkan asam-asam organik seperti asetat, laktat, dan butirat, yang menurunkan pH media (Saputri, 2021). Kedua, proses nitrifikasi, yakni konversi NH_4^+ menjadi NO_3^- oleh bakteri nitrifikasi, di mana proses ini menghasilkan ion H^+ sebagai produk samping, yang turut memperkaya keasaman media (Ramadhani *et al.,* 2025).

Selain itu, RM yang kaya akan logam seperti Al^{3+} dan Fe^{3+} dapat mengalami reaksi hidrolisis di lingkungan lembab, membentuk kompleks hidroksi dan melepaskan H^+. Reaksi ini meningkatkan keasaman, khususnya pada pH rendah hingga sedang (Aini *et al.,* 2017; Rui *et al.,* 2024). Adanya pH yang rendah juga dapat disebabkan oleh sifat alami tanah kebun itu sendiri, yang dimungkinkan berasal dari batuan induk silikat dengan kandungan basa yang rendah, di mana jenis tanah seperti ini memang umum ditemukan di daerah tropis yang sudah mengalami pelapukan (Sembiring *et al.,* 2013).

Tabel 3 menunjukkan kandungan bahan organik, nutrien, dan logam pada setiap reaktor penelitian, termasuk kontrol pada akhir masa RFT, yaitu pada hari ke-14. Secara umum, seluruh reaktor perlakuan (S1–S5) memperlihatkan peningkatan kandungan nutrien dan logam dibandingkan kontrol, khususnya pada parameter total karbon organik (TOC), kalium (K), serta beberapa unsur logam seperti kromium (Cr), vanadium (V), dan skandium (Sc). Hal ini mengindikasikan bahwa kombinasi RM dan pupuk kandang mempengaruhi komposisi kimia media tanam.

Kandungan makronutrien pada media tanam perlakuan teramati lebih tinggi dibandingkan dengan kontrol. Total karbon organik (TOC) meningkat hampir dua kali lipat dibandingkan kontrol (4.425 mg/kg), dengan nilai tertinggi pada reaktor S1 (10.675 mg/kg). TOC yang lebih tinggi dibandingkan kontrol utamanya dipengaruhi oleh kontribusi pupuk kandang yang mengandung 3.600 mg/kg TOC, sedangkan RM hanya berkontribusi minor (302,5 mg/kg). Nitrogen total juga mengalami peningkatan dibandingkan kontrol (6.460 mg/kg), dengan variasi tertinggi pada S5 (6.460 mg/kg). Demikian pula, fosfor total berkisar 2.270–5.690 mg/kg, yang masih berada dalam kisaran optimal pertumbuhan tanaman (FAO optimal: 2.000–6.000 mg/kg).

Peningkatan P dan N ini terutama didukung oleh kandungan awal pupuk kandang yang tinggi (N: 5.470 mg/kg; P: 14.540 mg/kg), sementara kontribusi RM relatif lebih rendah (N: 715 mg/kg; P: 2.670 mg/kg). Kalium (K) menunjukkan peningkatan pada semua perlakuan, berkisar 451.870–

526.930 mg/kg, lebih tinggi dibandingkan dengan kontrol (161.820 mg/kg). Angka ini merepresentasikan kontribusi dari pupuk kandang (1.187,9 mg/kg) yang memiliki kandungan kalium awal jauh lebih besar dibandingkan RM (125,9 mg/kg).

Unsur mikronutrien, seperti Zn, Cu, dan Ni, seluruh perlakuan menunjukkan akumulasi lebih tinggi dibandingkan kontrol, meskipun peningkatannya masih dalam kisaran aman dibawah baku mutu logam di tanah agrikultur oleh FAO/WHO. Zinc (Zn) berkisar 20,570–26,450 mg/kg, Copper (Cu) berada pada rentang 18,990–23,420 mg/kg, Nickel (Ni) antara 1,100–1,490 mg/kg, sementara Iron (Fe) berkisar antara 3.453–3.567 mg/kg dan relatif seragam antarperlakuan maupun kontrol, yang menandakan bahwa Fe tidak hanya berasal dari RM tetapi juga merupakan komponen alami tanah kebun. Keberadaan Ni dan Cu sebagian besar dikontribusikan oleh penambahan RM yang pada karakterisasi awalnya sudah terkandung Fe (3.368,45 mg/kg), Ni (1,930 mg/kg), dan Cu (9,660 mg/kg) cukup tinggi. Konsentrasi seluruh mikronutrien dalam reaktor perlakuan berada di bawah batas kandungan logam dalam tanah agrikultur berdasarkan FAO/WHO (Zn: 100 mg/kg; Cu: 100 mg/kg) (FAO/WHO 2002; FAO/WHO 2011).

Sebaliknya, peningkatan kandungan logam berat lainnya seperti Cr, V, dan Sc tampak lebih dominan pada media perlakuan yang mengandung RM. Kandungan Cr pada S5 tercatat sebesar 16,09 mg/kg, meningkat dibandingkan kontrol (6,31 mg/kg), namun masih jauh di bawah batas aman FAO/WHO sebesar 100 mg/kg. Kandungan V pada S5 mencapai 13,37 mg/kg, meningkat dua kali lipat dibandingkan kontrol (8,77 mg/kg), sementara kandungan Sc juga menunjukkan pola serupa, meningkat dari 5,21 mg/kg (kontrol) menjadi 7,58 mg/kg (S5).

Logam berat toksik seperti Pb, Ni, dan Cd terdeteksi dalam jumlah yang relatif rendah dan stabil. Konsentrasi Pb tertinggi pada S2 (3,26 mg/kg), tetap jauh di bawah batas FAO/WHO (100 mg/kg). Demikian pula, Cd maksimum terdeteksi sebesar 0,04 mg/kg, jauh di bawah batas FAO/WHO (3 mg/kg). Kandungan Ni tertinggi teramati pada reaktor S3 dan S5 sebesar 1,49 mg/kg, yang juga jauh di bawah ambang batas FAO/WHO (50 mg/kg).

Tabel 3. Kandungan Nutrien dan Logam Media Tanam pada Akhir Masa RFT

Parameter	Satuan	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**	**S5**	**Kontrol**	**Baku Mutu Logam di Tanah (FAO/WHO)**
A. Kandungan Total Organik Carbon (TOC) dan Makronutrien								
TOC	mg/kg	10.675	8.975	10.025	7.675	7.875	4.425	-
N	mg/kg	3.920	3.820	4.660	5.100	6.460	6.460	-
P	mg/kg	5.670	2.270	4.450	5.370	5.690	6.710	-
K	mg/kg	468,440	501,860	526,930	493,430	451,870	161,820	-
B. Mikronutrien								
Zn	mg/kg	21,580	26,450	24,800	23,730	20,570	19,010	100
Fe	mg/kg	3.453,5	3.567,1	3.471,0	3.468,3	3.483,0	3.466,5	50.000
Cu	mg/kg	20,410	23,420	22,290	20,470	18,990	19,390	100

Ni	mg/kg	1,100	1,380	1,490	1,420	1,490	1,080	50
C. Logam Berat Lainnya								
Pb	mg/kg	2,870	3,260	3,040	2,710	2,540	2,680	100
Cd	mg/kg	0,020	0,040	0,030	0,030	0,020	0,020	3
Cr	mg/kg	6,900	8,690	10,330	12,730	16,090	6,310	100
V	mg/kg	9,000	11,130	11,390	11,800	13,370	8,770	-
Sc	mg/kg	5,370	6,470	6,580	6,840	7,580	5,210	-

Peningkatan kandungan nutrien serta logam mikro-mineral pada media perlakuan ini mengindikasikan adanya sinergi dari penambahan RM dan pupuk kandang. Penambahan pupuk kandang memberikan kontribusi utama terhadap bahan organik dan makronutrien (Saputri, 2021). Sementara RM dapat berkontribusi terhadap menyuplai mikronutrien logam seperti Fe, Ni, dan V serta logam lain seperti Cr dan Sc. Hal ini sejalan dengan penelitian oleh Gautam dan Agrawal (2019) yang menunjukkan bahwa penambahan RM ke dalam media tanam berkontribusi terhadap peningkatan kadar unsur-unsur tertentu, terutama logam seperti Fe, Ni, dan Cu yang penting bagi fisiologis tanaman.

B. Evaluation of the Airport Sewerage Systems and Sanitation Unit Wastewater Treatment Plant Wastewater Qualities and Treatment Efficiency.

Tabel 4 menunjukkan hasil pengamatan visual pertumbuhan *Brassica juncea* selama 14 hari masa RFT. Berdasarkan pengamatan, tanaman mampu mempertahankan kelangsungan hidupnya pada media dengan komposisi 3%, 5%, dan 10% RM (reaktor S1, S2, dan S3), di mana seluruh individu pada reaktor teramati dapat bertahan hidup. Daun bagian bawah yang menguning, kemudian layu dan gugur pada akhir masa RFT, teramati pada ketiga reaktor tersebut. Gejala ini dimungkinkan terjadi akibat fase adaptasi tanaman dan pengaruh media tanam, seperti pH asam yang meningkatkan bioavailabilitas logam, sehingga lebih mudah diserap oleh tanaman dan memengaruhi proses fisiologisnya (Hua *et al.,* 2017). Meskipun demikian, tanaman tetap mampu mempertahankan hidup, yang ditunjukkan dengan munculnya tunas daun baru dan tidak ditemukannya kematian tanaman hingga hari ke-14, mengindikasikan kemampuan adaptasi dan perkembangan tanaman pada dosis tersebut (Purwanti *et al.,* 2012; Wu *et al.,* 2022).

Sebaliknya, pada reaktor S4 dan S5 (15% dan 20% RM), sebagian besar tanaman menunjukkan gejala kelayuan sejak hari ke-7, yang kemudian diikuti oleh kematian tanaman pada hari ke-14. Sebagai pembanding, tanaman pada reaktor kontrol (tanpa RM) menunjukkan pertumbuhan yang baik, meskipun teramati adanya beberapa daun yang layu pada hari ke-7. Hal ini dimungkinkan karena masa adaptasi tanaman terhadap media baru, serta ketiadaan penambahan amandemen pada kontrol, yang menyebabkan rendahnya kadar nutrisi dalam tanah untuk mendukung pertumbuhan optimal. Namun demikian, dengan munculnya tunas daun baru dan tidak adanya kematian tanaman hingga hari ke-14, hal ini tetap menunjukkan bahwa tanaman kontrol dapat beradaptasi dan tumbuh pada kondisi media tersebut (Wu *et al.,* 2022).

Journal Purifikasi
DOI: https://doi.org/10.12962/purifikasi.v24i1.504

Tabel 4. Pengamatan Visual dan Kelangsungan Hidup *Brassica Juncea* selama RFT

Kode Reaktor	Hari Ke-1	Hari Ke-7	Hari Ke-14
S1			
S2			
S3			
S4			
S5			
Kontrol			

Berdasarkan Tabel 4, teramati tanaman mengalami kematian pada dosis RM 15% (S4) dan 20% (S5). Hal ini dimungkinkan adanya peningkatan kadar logam berat yang bersifat fitotoksik pada dosis tersebut yang melebihi batas toleransi tanaman dan menyebabkan kematian pada tanaman (Angon *et al.,* 2024). Teramati pula pada Tabel 3 kandungan logam seperti Ni, Cr, V, dan Sc menunjukkan tren peningkatan seiring dengan dosis RM yang semakin besar. Sehingga dimungkinkan logam tersebut (Ni, Cr, V, dan Sc) menjadi faktor pembatas terhadap kelangsungan hidup tanaman pada reaktor S4 dan S5. Meskipun unsur mikronutrien dibutuhkan oleh tanaman, konsentrasi yang berlebihan dapat menyebabkan kerusakan jaringan tanaman, di mana apabila kadar logam melebihi ambang toleransi tanaman maka akan menyebabkan gangguan fisiologis hingga kematian tanaman (Tavanti *et al.,* 2021).

Kandungan kromium meningkat dari 6,90 mg/kg pada dosis 3% (S1) meningkat menjadi 16,09

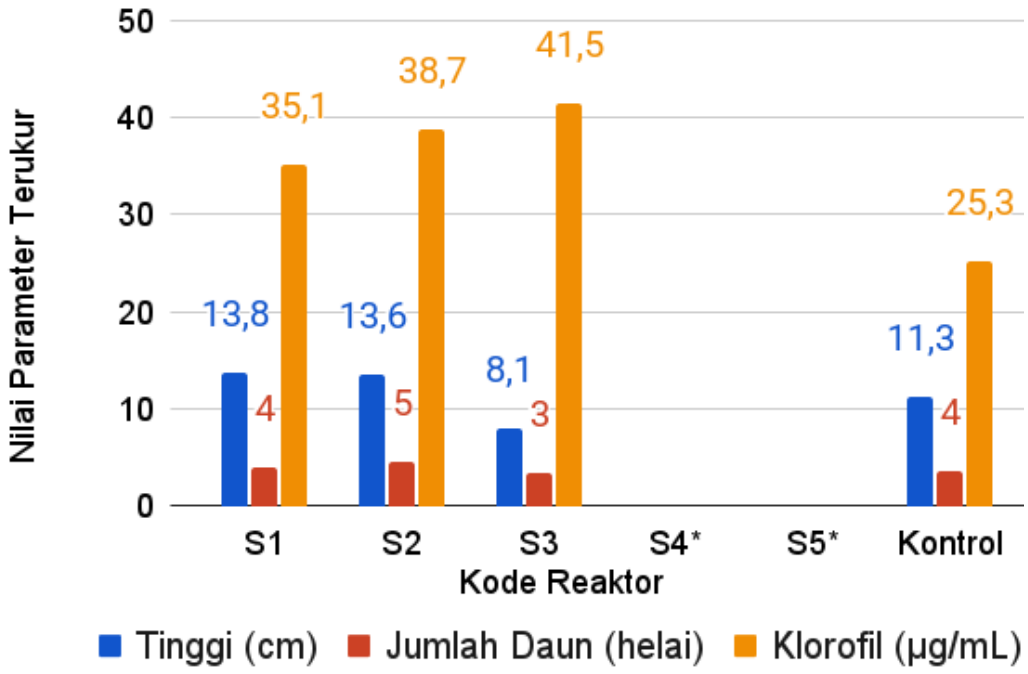
This journal is © Marsono, et al. 2026

mg/kg pada dosis 20% (S5). Toksisitas kromium diketahui dapat menghambat pertumbuhan akar, proses fotosintesis, serta menstimulasi produksi spesies oksigen reaktif (ROS) yang merusak struktur sel (Shanker *et al.,* 2005;). Hal serupa juga terjadi pada vanadium, yang meningkat dari 9 mg/kg (S1) menjadi 13,37 mg/kg (S5), dan telah dilaporkan memiliki efek toksik terhadap sintesis klorofil dan efisiensi fotosintetik (Mansoor *et al.,* 2022). Nikel (Ni) juga dapat berkontribusi terhadap penurunan viabilitas tanaman karena dalam konsentrasi tinggi dapat menyebabkan disfungsi metabolik dan menurunkan aktivitas enzim pertumbuhan (Ahmed *et al.,* 2024).

C. Analisis Parameter Pertumbuhan *Brassica Juncea* pada Akhir Masa Uji Dosis Red Mud

Pengaruh dari perlakuan penambahan terhadap morfologi dan fisiologi tanaman direfleksikan melalui parameter pertumbuhan seperti tinggi tanaman, jumlah daun, kandungan klorofil, berat basah dan berat kering tanaman. Dibandingkan dengan kontrol, penambahan amandemen RM yang dikombinasikan dengan pupuk kandang secara umum teramati peningkatan konsentrasi klorofil dengan pengaruh terhadap tinggi tanaman dan jumlah daun bervariasi tergantung pada komposisi perlakuan yang diberikan (Gambar 2).

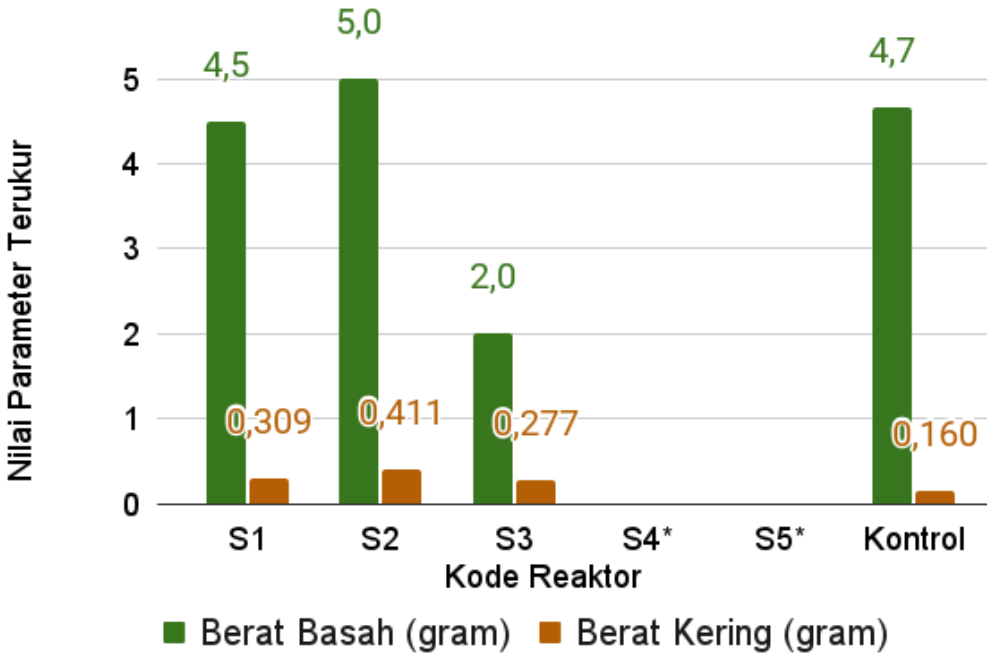
Pada perlakuan S1, merupakan tanaman tertinggi dibandingkan dengan perlakuan lainnya. Dibandingkan dengan kontrol, tinggi tanaman S1 mencapai 13,8 cm, meningkat sebesar 22% dari kontrol (11,3 cm), sementara jumlah daun tetap sama yaitu 4 helai. Kandungan klorofil meningkat menjadi 35,1 µg/mL, atau naik sebesar 38,7% dibandingkan kontrol (25,3 µg/mL). Temuan ini mengindikasikan bahwa amandemen pada S1 mampu meningkatkan biosintesis pigmen, kemungkinan melalui peningkatan ketersediaan unsur hara yang mendukung aktivitas fotosintesis dan membantu meningkatkan metabolisme yang mendukung pertumbuhan tanaman (Usmani *et al.,* 2025).



Gambar 2. Grafik Tinggi, Jumlah Daun, dan Kandungan Klorofil *B. Juncea* pada Akhir Masa RFT.
*Tanaman mengalami kematian pada akhir masa RFT

Pada perlakuan S2 teramati menunjukkan pertumbuhan yang baik pada setiap paramter. Dengan tinggi tanaman S2 (13,6 cm) yang hampir sama dengan tanaman S1 (13,8 cm), tanaman pada reaktor S2 teramati memiliki jumlah daun yang lebih banyak (5 helai), bahkan dibandingkan dengan seluruh reaktor perlakuan dan kontrol. Dibandingkan dengan kontrol, tinggi tanaman mencapai 13,6 cm (peningkatan 20%), jumlah daun meningkat menjadi 5 helai (peningkatan 25%), dan kandungan klorofil naik menjadi 38,7 µg/mL (peningkatan 53%). Peningkatan pada parameter morfologi dan fisiologi ini menunjukkan bahwa kombinasi amandemen pada S2 menunjukkan kecenderungan yang lebih baik dibandingkan perlakuan lainnya, di mana hal ini mengindikasikan adanya efek sinergis antar amandemen yang meningkatkan asimilasi unsur makro dan mikro, khususnya nitrogen, magnesium, besi, dan mangan, yang penting dalam sintesis klorofil dan perkembangan vegetatif, termasuk tinggi dan jumlah daun (Semenova *et al.,* 2024).

Sebaliknya, pada perlakuan S3 meskipun kandungan klorofil mencapai nilai tertinggi dibandingkan seluruh reaktor perlakuan, yaitu 41,5 µg/mL (peningkatan 64% dibandingkan kontrol), tinggi tanaman dan jumlah daun justru menunjukkan nilai paling kecil dari seluruh reaktor termasuk kontrol, dengan nilai tinggi tanaman sebesar 8,1 cm (penurunan 28% dibandingkan kontrol) dan 3 helai (penurunan 25% dibandingkan kontrol). Penurunan pertumbuhan yang disertai peningkatan klorofil ini dapat mencerminkan adanya kondisi sub-toksik atau stres fisiologis akibat dosis amandemen yang diberikan. Peningkatan konsentrasi klorofil menunjukkan peran adaptif klorofil pada stress ringan akibat logam, di mana hal ini merupakan mekanisme pertahanan fisiologis tanaman. Respon ini berfungsi sebagai strategi protektif awal yang memperkuat kapasitas sistem untuk menghadapi stres yang lebih berat, seperti pencemaran yang lebih tinggi ataupun potensi serangan herbivora, pada rentang waktu tertentu. Oleh karena itu, akumulasi klorofil akibat paparan stres ringan memiliki implikasi penting dalam dinamika ekofisiologi, interaksi biotik, dan proses evolusi adaptif (Agathokleous, 2020).



Gambar 3. Grafik Berat Basah dan Berat Kering *B. Juncea* pada Akhir Masa RFT. *Tanaman mengalami kematian pada akhir masa RFT

Gambar 3 menunjukkan berat basah dan berat kering tanaman pada akhir masa RFT. Biomassa tanaman, yang direpresentasikan oleh berat basah dan berat kering, merupakan indikator penting untuk mengevaluasi kemampuan tanaman dalam mengkonversi hasil fotosintesis menjadi jaringan tanaman. Berat basah menggambarkan akumulasi total biomassa termasuk kandungan air, sementara berat kering lebih merefleksikan akumulasi biomassa struktural hasil asimilasi karbon yang bersih (Coimbra *et al.,* 2023).

Pada perlakuan S2, berat basah mencapai 5,0 gram dan berat kering sebesar 0,411 gram, yang merupakan nilai tertinggi di antara seluruh perlakuan. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi amandemen pada S2 mampu mendukung pertumbuhan biomassa secara optimal, baik dari sisi akumulasi jaringan maupun efisiensi konversi karbon. Peningkatan ini juga sejalan dengan hasil pengamatan parameter morfologi dan fisiologi sebelumnya, di mana pada perlakuan S2 teramati tinggi tanaman (13,6 cm) dan jumlah daun (5 helai) yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan lainnya, serta kandungan klorofil (38,7 µg/mL) yang lebih tinggi dibanding kontrol. Konsistensi pola peningkatan ini menunjukkan kondisi nutrisi dan fisiologi yang optimal dalam mendukung pertumbuhan vegetatif (Semenova *et al.,* 2024; Usmani *et al.,* 2025).

Pada perlakuan S1, berat basah mencapai 4,5 gram dan berat kering 0,309 gram. Meskipun berat basah sedikit lebih rendah dibanding kontrol (4,7 gram), namun berat kering meningkat hampir dua kali lipat dari kontrol (0,160 gram). Hal ini berkaitan dengan kandungan klorofil (35,1 µg/mL) yang lebih tinggi dibanding kontrol, di mana kondisi ini dapat mengindikasikan adanya aktivitas fotosintesis yang cukup baik dibandingkan kontrol yang diringi dengan kemampuan asimilasi biomassa, meskipun tetap nilai berat kering yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan perlakuan S2 (Usmani *et al.,* 2025).

Sebaliknya, perlakuan S3 menunjukkan penurunan biomassa, dengan berat basah sebesar 2,0 gram dan berat kering 0,277 gram. Penurunan biomassa ini terjadi meskipun kandungan klorofil mencapai nilai tertinggi (41,5 µg/mL) dibandingkan seluruh perlakuan. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan pigmentasi fotosintesis tidak selalu berbanding lurus dengan akumulasi biomassa (Coimbra *et al.,* 2023; Hu *et al.,* 2021). Kandungan klorofil yang sangat tinggi dapat merupakan sebuah respon stres terhadap lingkungan, sehingga akumulasi biomassa tidak dapat berjalan optimal (Agathokleous, 2020).

Pada reaktor kontrol menunjukkan berat basah yang lebih tinggi dibandingkan S3 namun tetap lebih rendah dibandingkan dengan S1 dan S2. Namun ditinjau berdasarkan berat kering, kontrol menunjukkan nilai terendah (0,160 gram). Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan penambahan amandemen RM yang dikombinasikan dengan pupuk kandang berperan positif terhadap *yield* biomassa tanaman yang dihasilkan. Hasil ini menunjukkan bahwa red mud dalam dosis rendah yang dikombinasikan dengan pupuk kandang dapat meningkatkan performa fisiologis tanaman (Gautam & Agrawal, 2019).

Dalam penelitian Gautam & Agrawal (2019), variasi dosis red mud 0–15% (w/w) pada media dengan pupuk kandang (rasio tanah:pupuk kandang 2:1) menunjukkan bahwa dosis 10% memberikan respon pertumbuhan *Brassica juncea* terbaik, dengan peningkatan biomassa tajuk hingga 59,6% dan hasil biji 140,5% dibandingkan dengan kontrol. Pada penelitian tersebut juga menunjukan penambahan red mud menghasilkan pertumbuhan yang lebih baik dibanding tanah

dengan pupuk kandang saja, mengindikasikan adanya sinergi antara red mud sebagai sumber mikronutrien (Fe, Zn, dan Mn) dan pupuk kandang sebagai penyedia hara makro (kadar organik, N, P, dan K) sekaligus perbaikan sifat fisik tanah (Gautam & Agrawal, 2019).

Perbaikan dari penambahan amandemen ini juga dapat dimungkinakan karena pupuk kandang juga membantu menekan efek salinitas akibat tingginya natrium pada RM dan menstabilkan bioavailabilitas logam berat, seperti yang dilaporkan pada Gautam & Agrawal (2019) penurunan phytoavailable Cd dari 0,42 menjadi 0,29 mg/kg pada 10% RM. Kombinasi ini secara keseluruhan menciptakan kondisi nutrisi dan fisiologi yang lebih aman serta mendukung pertumbuhan optimal meskipun kandungan total logam meningkat (Gautam & Agrawal, 2019; Saputri, 2021).

Penelitian ini meunjukkan bahwa penambahan red mud pada dosis rendah (5% RM) dapat mendukung pertumbuhan tanaman. Hua et al. Dalam tinjauan Hua et al. (2017), peningkatan biomassa dilaporkan pada beberapa komoditas pangan dan sayuran. Pada aplikasi 1% red mud di tanaman *Brassica rapa chinensis* (pakchoi), biomassa di atas permukaan tanah meningkat sebesar 64% dibandingkan kontrol. Selain itu, pada tanaman *Lactuca sativa* (lettuce), aplikasi 2% hingga 5% red mud mampu meningkatkan biomassa sebesar 131% hingga 413% dibandingkan kontrol. Peningkatan biomassa ini mencerminkan peran red mud sebagai sumber mikronutrien esensial sekaligus agen imobilisasi logam berat, sehingga menekan fitotoksisitas dan memungkinkan tanaman mengalokasikan hasil fotosintesis ke pertumbuhan vegetatif secara lebih optimal (Hua *et al.,* 2107).

Pemanfaatan *red mud* sebagai amandemen tanah dalam penelitian ini tidak hanya menawarkan pendekatan yang secara teknis layak untuk meningkatkan kesuburan tanah, tetapi juga sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular melalui konversi limbah industri menjadi input pertanian yang bernilai tambah. Strategi ini berkontribusi pada pencapaian beberapa Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), khususnya SDG 12 (*Responsible Consumption and Production*) melalui peningkatan efisiensi pemanfaatan sumber daya dan pengurangan timbulan limbah; SDG 15 (*Life on Land*) melalui restorasi kualitas tanah dan rehabilitasi lahan terdegradasi; serta SDG 9 (*Industry, Innovation and Infrastructure*) dengan mendorong penerapan inovasi dalam pengelolaan limbah industri secara berkelanjutan (Bose *et al.,* 2024).

4. CONCLUSION

Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa *red mud* (RM) berpotensi dimanfaatkan sebagai amandemen tanah secara berkelanjutan dalam sistem pertanian, khususnya ketika dikombinasikan dengan bahan organik seperti pupuk kandang. Penggunaan RM dalam dosis rendah (hingga 10%) dapat membantu perbaikan ketersediaan hara dan pertumbuhan tanaman menunjukkan kecenderungan lebih baik dibandingkan dengan kontrol, serta konsentrasi logam berat pada tanah masih berada pada rentang aman. Penelitian ini merupakan gambaran awal sehingga diperlukan kajian lebih lanjut mencakup akumulasi logam dalam jaringan tanaman dan uji lapangan jangka panjang guna menilai stabilitas manfaat dan risiko aplikasi RM sebagai bahan amandemen tanah dalam sistem pertanian berbasis ekonomi sirkular.

This journal is © Marsono, et al. 2026

REFERENCES

Agathokleous, E., Feng, Z., & Peñuelas, J. (2020). Chlorophyll hormesis: Are chlorophylls major components of stress biology in higher plants? *Science of The Total Environment, 726*, 138637. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138637

Ahmed, N., Zhang, B., Chachar, Z., Li, J., Xiao, G., Wang, Q. & Tu, P. (2024). Micronutrients and their effects on horticultural crop quality, productivity and sustainability. *Scientia Horticulturae*, *323*, 112512. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112512

Aini, S. N., Iskandar, I., & Darmawan, D. (2017). The utilization of *red mud* as a plant growing medium with the addition of Ultisol soil material and compost. *SAINS TANAH - Journal of Soil Science and Agroclimatology, 14*(2), 51–62. http://dx.doi.org/10.15608/stjssa.v14i2.863

Al-Hakim, N., Aminudin, A., & Iryanti, M. (2023). Sistem Kendali Kadar Air Tanah Pada Tanaman Tomat Ceri Menggunakan Mikrokontroler Esp32 Dengan Algoritma Long ShortTerm Memory. *In Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal)* (Vol.11). https://doi.org/10.21009/03.1101.fa07

Angon, P. B., Islam, M. S., Das, A., Anjum, N., Poudel, A., & Suchi, S. A. (2024). Sources, effects and present perspectives of heavy metals contamination: Soil, plants and human food chain. *Heliyon*, *10*(7). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28357

Arnon, D.I. (1949) Copper Enzymes in Isolated Chloroplasts. Polyphenoloxidase in Beta Vulgaris. *Plant Physiology, 24,* 1-15. http://dx.doi.org/10.1104/pp.24.1.1

Asih, E. D., & Mukarlina, I. L. (2015). Toleransi tanaman sawi hijau (Brassica juncea L.) terhadap cekaman salinitas garam NaCl. *Protobiont, 4*(1). https://doi.org/10.26418/protobiont.v4i1.9764

Bose, B. P. (2024). Comprehensive Utilizations of Red Mud with Emphasis on Circular Economy: An Approach towards Achieving the United Nations Sustainable Development Goals. *International Journal of Earth Sciences Knowledge and Applications*, *6*(2), 253-261.

Coimbra, E. C. L., Borges, A. C., Mounteer, A. H., & Rosa, A. P. (2023). Using wastewater treatment performance, biomass and physiological plant characteristics for selection of a floating macrophyte for phytoremediation of swine wastewater through the integrative Entropy-Fuzzy AHP-TOPSIS method. *Journal of Water Process Engineering*, *53*, 103793. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103793

FAO/WHO. 2002. Codex Alimentarius. General Standard for Contaminants and Toxins in Food and Feed. Shedule 1 Maximum and Guidline Levels for Contaminants and Toxins in Food. Reference CX/FAC 02/16. Joint FAO/WHO Food Standards Programme, Codex Committe, Rotterdam, The Nertherlands.

FAO/WHO. 2011. Joint AO/WHO Food Standards Program Codex Committe on Contaminants in Food, Food CF/5INF/1. Fifth Session. The Hague, The Netherlands.

GE Analytical Instruments. (2011). *Sievers InnovOx Laboratory TOC Analyzer: Operation and Maintenance Manual*. GE Analytical Instruments, USA.

Harahap, F. S., Kurniawan, D., & Susanti, R. (2021). Pemetaan status pH tanah dan c-organik tanah sawah tadah hujan di Kecamatan Panai Tengah Kabupaten Labuhanbatu. *Agrosains: Jurnal Penelitian Agronomi*, *23*(1), 37-42. https://doi.org/10.20961/agsjpa.v23i1.48479

Hoidal, N., Díaz Gallardo, M., Jacobsen, S. E., & Alandia, G. (2019). Amaranth as a dual-use crop for leafy greens and seeds: Stable responses to leaf harvest across genotypes and environments. *Frontiers in Plant Science, 10,* 817.

Hu, H. J., Xu, K., He, L. C., & Wang, G. X. (2021). A model for the relationship between plant biomass and photosynthetic rate based on nutrient effects. *Ecosphere*, *12*(8), e03678. http://dx.doi.org/10.1002/ecs2.3678

Hua, Y, Heal, K & Friesl-Hanl, W. (2017). The use of Red mud as an immobiliser for metal/metalloid contaminated soil: A review', *Journal of Hazardous Materials, 325,* 17-30. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.073

Irshad, M.; Shazia, G.; Eneji, A.E.; Anwar, Z.; Ashraf, M. (2014). Extraction of heavy metals from manure and their bioavailability to spinach (Spinacia oleracea L.) after composting. J*. Plant Nutr.37,* 1661–1675.

Kim, M. S., Chae, E., Min, H. G., & Kim, J. G. (2024). Applicability of Brassica juncea as a bioindicator for As contamination in soil near the abandoned mine area. *Journal of Environmental Management*, *358*, 120805. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120805

Li, Q., Sun, J., Huang, X., & Zhao, L. (2022). Adaptive mechanisms of chlorophyll metabolism in plants under environmental stress. *Plants, 11*(6), 775. https://doi.org/10.3390/plants11060775.

Lombi, E., Hamon, R. E., McGrath, S. P., & McLaughlin, M. J. (2003). Lability of Cd, Cu, and Zn in polluted soils treated with lime, beringite, and red mud and identification of a non-labile colloidal fraction of metals using isotopic techniques. *Environmental science & technology*, *37*(5), 979-984. https://doi.org/10.1021/es026083w

Mansoor, S., Baba, T. R., Khan, I. F., Jan, S., Rafiq, S., Rinklebe, J., & Ahmad, P. (2022). Vanadium in plants: Present scenario and future prospects. In *Vanadium in Soils and Plants* (pp. 205-222). CRC Press. ISBN 9781003173274

Mayes, W. M., I. T. Burke, H. I. Gomes, A. D. Anton, M. Molnár, V. Feigl, and E. Ujaczki. 2016. Advances in understanding environmental risks of Red mud after the Ajka Spill, Hungary. *Journal of Sustainable Metallurgy 2*:332–43. doi:10.1007/s40831-016-0050-z

Moore, D. S., Notz, W. I, & Flinger, M. A. (2013). *The basic practice of statistics (6th ed.).* New York, NY: W. H. Freeman and Company. Page (138).

Mucsi, G., Halyag, N., Kurusta, T., & Kristály, F. (2021). Control of carbon dioxide sequestration by mechanical activation of red mud. *Waste and Biomass Valorization*, *12*(12), 6481-6495. https://doi.org/10.1007/s12649-021-01466-2

OECD. (2006). *Test No. 208: Terrestrial Plant Test: Seedling Emergence and Seedling Growth Test*.

Praja, A. A. S. (2024). *Potensi Jatropha curcas dan Sansevieira trifasciata Sebagai Agen Phytomining Logam Kromium (Cr) dan Vanadium (V) Pada Red Mud (Doctoral dissertation,* Institut Teknologi Sepuluh Nopember).

Purwanti, I. F., Mukhlisin, M., Abdullah, S. R. S., Basri, H., Idris, M., Hamzah, A., & Latif, M. T. (2012). Range finding test of hydrocarbon on Scirpus mucronatus as preliminary test for phytotoxicity of contaminated soil. *Revelation and Science, 2*(1), 59–63.

Ramadhani, R. P., Ifansyah, H., & Kurnain, A. (2025). Pengaruh Pemberian Pupuk Urea, Zeolit dan Asam Humat Terhadap Pertumbuhan Bawang Daun (Allium fistulosum L.) dan Perubahan

Beberapa Sifat Kimia Tanah Pada Lahan Gambut. *Agroekotek View*, *7*(1), 1-9. https://doi.org/10.20527/agtview.v7i1.4081

Ramos, J., Clemente, M. R., & Barreno, E. (2002). Effects of vanadium on growth, chlorophyll and antioxidant enzyme activities in Pteris vittata. *Plant and Soil, 239,* 69–75.

Rui, D., Li, M., Kim, M., Zhang, J., Nie, W., Wang, S., & Liu, S. (2024). Experimental study on the dealkalization of red mud using the freeze-thaw and acid washing method. *Cold Regions Science and Technology*, *219*, 104122.http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2024.104122

Saputri, I. (2021). Analisis NPK pupuk organik cair dari berbagai jenis air cucian beras dengan metode fermentasi yang berbeda. *Jurnal Agrotech*, *11*(1), 36-42. https://doi.org/10.31970/agrotech.v11i1.62

Schumacher, B.A. (2002) Methods for the Determination of Total Organic Carbon (TOC) in Soils and Sediments. Environmental Protection Agency, Washington DC.

Sembiring, I. S. S. M. B., Mukhlis, M., & Sitorus, B. (2013). Perubahan sifat kimia Andisol akibat pemberian silikat dan pupuk P untuk meningkatkan produksi kentang (Solanum tuberosum L.). *Jurnal Agroekoteknologi Universitas Sumatera Utara*, *1*(4), 95784. https://doi.org/10.32734/jaet.v1i4.4388

Semenova, N. A., Burmistrov, D. E., Shumeyko, S. A., & Gudkov, S. V. (2024). Fertilizers based on nanoparticles as sources of macro-and microelements for plant crop growth: A review. *Agronomy*, *14*(8), 1646. https://doi.org/10.3390/agronomy14081646

Shanker, A. K., Cervantes, C., Loza-Tavera, H., & Avudainayagam, S. (2005). Chromium toxicity in plants. *Environment International,* *31*(5), 739–753. https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.02.003

Svobodova-Sedlackova, A., Calderón, A., Fernandez, A. I., Chimenos, J. M., Berlanga, C., Yücel, O., & Rodriguez, R. (2024). Mapping the research landscape of bauxite by-products (Red mud): An evolutionary perspective from 1995 to 2022. *Heliyon, 10*(3).

Tangahu, B. V., Winata, A. Y., Arliyani, I. (2021). Range finding test and measurement of wet weight and dry weight of Vetiveria zizanioides(L.) Nash as an initial stage of phytoremediation of soil contaminated with used lubricants. *Plant Science Today* *9*(2): 331–335. https://doi.org/10.14719/pst.1442

Tavanti, T. R., de Melo, A. A. R., Moreira, L. D. K., Sanchez, D. E. J., dos Santos Silva, R., da Silva, R. M., & Dos Reis, A. R. (2021). Micronutrient fertilization enhances ROS scavenging system for alleviation of abiotic stresses in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, *160*, 386-396. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.01.040

Umaternate, G. R., Abidjulu, J., & Wuntu, A. D. (2014). Uji metode Olsen dan Bray dalam menganalisis kandungan fosfat tersedia pada tanah sawah di Desa Konarom Barat Kecamatan Dumoga Utara. *Jurnal MIPA,* *3*(1), 6-10. http://dx.doi.org/10.35799/jm.3.1.2014.3898

US EPA. (1994). Method 200.7: Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry, Revision 4.4. Environmental Monitoring Systems Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency.

US EPA. (1996). Method 3050B: Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils. Revision 2. Environmental Protection Agency, Washington DC.

Usmani, L., Shakil, A., Khan, I., Alvi, T., Singh, S., & Das, D. (2025). Brassinosteroids in micronutrient homeostasis: Mechanisms and implications for plant nutrition and stress resilience. *Plants*, *14*(4), 598. https://doi.org/10.3390/plants14040598

Wang, M., & Liu , X. (2021). Applications of Red mud as an environmental remediation material: A review. *Journal of Hazardous Materials, 408*, 124420. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124420

Wu, X., Nguyen, H., Kim, D., & Peng, H. (2022). Chronic toxicity of PFAS-free AFFF alternatives in terrestrial plant Brassica rapa. *Science of the Total Environment*, *850*, 158100. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158100

Yusmayani, M & Asmara (2019). Analisis kadar nitrogen pada pupuk urea, pupuk cair dan pupuk kompos dengan metode kjeldahl. *Amina, 1*(1), 28-34.

Yusuf, M., Fariduddin, Q., Hayat, S., & Ahmad, A. (2011). Nickel: An overview of uptake, essentiality and toxicity in plants. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 86*(1), 1–17. https://doi.org/10.1007/s00128-010-0171-1

Zhang, Y., Liu, X., Wang, J., & Chen, Y. (2021). Chlorophyll response and oxidative stress in plants under heavy metal exposure. *Environmental Science and Pollution Research, 28*(24), 31153–31165. https://doi.org/10.1007/s11356-021-14291-7